

令和 2 年 6 月 27 日現在

機関番号：13201
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2017～2019
課題番号：17K18509
研究課題名（和文）青銅器の特異な磁性を解読する研究方法の開発

研究課題名（英文）Magnetic analysis of the bronze ware

研究代表者

酒井 英男（Sakai, Hideo）

富山大学・理学部・客員教授

研究者番号：30134993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000 円

研究成果の概要（和文）：青銅の磁化は従来、考古地磁気の対象になっていない。理由は、青銅の主成分の銅と錫は反磁性であり、残留磁化は持たないとの先入観念があったためである。本研究では、青銅は磁化率では明瞭な反磁性を示すが、それと共に、極微量含まれる強磁性粒子が担う残留磁化を持っていることを見つけた。製作時の地磁気を記憶しているこの残留磁化を用いて、青銅製品の年代や製造法等を探る研究の有用性を、実験鑄造の青銅片や遺物の研究で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

青銅器は古代に国内外で多く生産されており、考古学での重要な研究対象となっている。その理化学研究として蛍光X線分析が活用されてきたが、本研究により年代・産地を探ることができる磁化研究が新たに可能になったことは考古学に役立つ大きな成果である。物理学でも、青銅の反磁性・残留磁化を併せ持つ特異な磁性のデータは重要な情報となる。また磁化研究は、富山県高岡市の地域産業である青銅等の鑄造技術に役立つと考えられ、社会的貢献としても意義のある成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Bronze, the alloy composed of mainly copper and tin is the important material in the archeological remains. The magnetic property of bronze is diamagnetic; however we found the remanent magnetization in the bronze carried by the ferromagnetic particles as the impurities. The remanent magnetization records the geomagnetic field at the casting, so that the magnetization is valuable to study the age and the casting process of the bronze. Further, the magnetic susceptibility is useful to estimate the content of copper and tin in the bronze, and also the flow of casting hot water. We examined the efficiency of the magnetic method through applying the method to the bronze bell remains.

研究分野：考古地磁気学

キーワード：青銅製遺物 銭貨 鑄型 残留磁化 帯磁率 年代

1. 研究開始当初の背景

考古学において青銅は多くの遺物の材料として重要であり、理化学研究も蛍光 X 線分析を中心に様々な方法で行われてきた。年代・産地研究の為の新たな研究が求められる中で、本研究では磁化を利用する研究を考えた。焼土・土器等では、地磁気の記録となった残留磁化を獲得していることから、磁化による年代・製造の研究が行われている。青銅は組成の殆どが反磁性の銅・錫の合金のため、残留磁化を持たないと考えられ、磁化研究は従来行われていない。近年、機器の精度向上で微弱磁化も測定できる様になった。そこで、青銅の反磁性と共存する残留磁化を検証し、残留磁化による青銅遺物の年代・産地等の新規研究法の有用性を検証することを計画した。

2. 研究の目的

青銅が残留磁化を持つことをまず検証する。反磁性と共に強磁性も持つ青銅の特異な磁性は、物理学でも重要である。残留磁化は、微量に含まれる強磁性粒子の様相を反映し、鑄造時に地磁気の記録となるので、これを用いて、製品の年代、産地、製造方法の研究が行える。また青銅の反磁性は銅・錫に依存し、帯磁率研究が青銅の銅・錫の分布を知る方法になると考えられる。磁化による新たな青銅の研究法の開発と、その有用性の検討が本研究の目的である。

3. 研究の方法

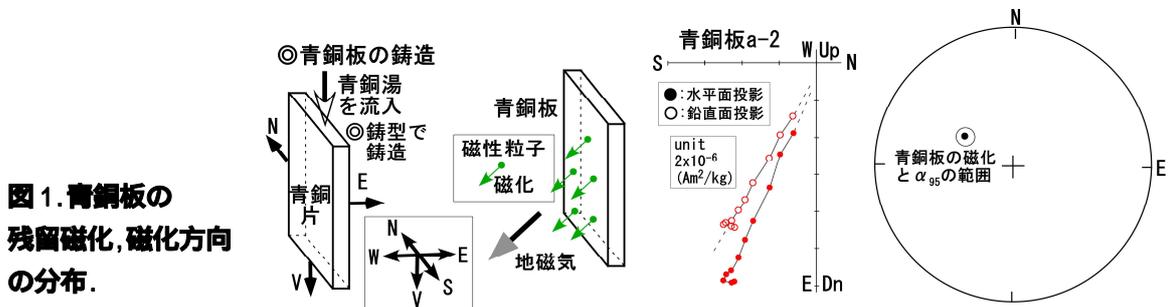
青銅の磁性として、主に帯磁率と残留磁化を研究する。青銅の帯磁率は主成分の銅・錫の反磁性により負の値を示すと考えられるが、それを高感度帯磁率計で探る。帯磁率の異方性も研究し、銅・錫の反磁性粒子の青銅中での配向も検討する。残留磁化は主に超伝導磁力計を用いて研究し、交流・熱消磁により磁化の安定性もチェックする。まず青銅が有意な強度の残留磁化を持っているかを調べ、そして残留磁化が周囲磁場の情報を記録するかを検討する。

4. 研究成果

(1) 鑄造青銅板の研究

富山大学で鑄造した青銅板について、1cm 四方のメッシュ状に切り出し整形した試料を用いて研究を行った。青銅板は3枚用意し、各板から10-12個の試料を作成した。XRF分析では青銅板の組成の97%以上が銅と錫であり、錫の含有量は12-18%であった。帯磁率測定を行った結果、全ての試料が負の値を示し、青銅の反磁性は明瞭に確認できた。

残留磁化の測定では、各試料は $10^{-5} \text{Am}^2/\text{kg}$ の強度の磁化を持っていた。交流消磁では、低・高保磁力の成分が違う方向を示す青銅板もあり、これは鑄造(冷却)時に鑄型と共に動いた為と判断された。高保磁力成分の磁化方向は、各青銅片で揃っていた。以上の結果は、青銅中の強磁性鉱物の磁化を捉えたものであり、国内外で始めて反磁性と強磁性を有する青銅の特異な磁性の検出に成功した。



熱消磁では、磁化は青銅湯が冷え固まる過程で獲得されていることが検証された。また帯磁率異方性の測定では、青銅湯の流れに伴う粒子配向が検討でき、製造法の研究に有用とわかった。磁化の水平面を基準とする伏角を求めると、生産地(緯度)が研究でき、また過去の地磁気の変化との比較から年代推定も可能となる。文化財や考古遺物として重要な青銅器では金属・化学分析は多く行われているが、今

後、磁化研究による年代、産地、製造法の検討も活用が期待できる。

(2) 平治二年銘梵鐘の磁化研究

静岡県袋井市の茶園改植現場で見つかった平治二年(1160年)の銘を有する梵鐘を研究した。同梵鐘は、破損箇所があるもののほぼ完存していた。平治二年の銘は、有銘鐘として国内12番目の古さを示すが、年代には疑問が持たれていた。理由は、鐘が当初の鐘に銅を加え再鑄造されていること、銘文中の「高松院」の宣下年代は応保二年(1162年)であり矛盾すること、また形状・文様に中世の要素が見られることであった。そして製作時期は、1162年より下る可能性が示唆されていた。また元興寺文化財研究所の考古学の検討(2014)では、12世紀末葉か13世紀に近い年代が推定されていた。

図2の梵鐘の破片7点を研究した。周囲との接合関係から原位置が推定でき、実測図から破片の傾きを復元した。磁化測定では、平均の磁化強度として $3.8 \times 10^{-4} \text{Am}^2/\text{kg}$ が得られ、残留磁化が確認できた。次に、交流磁場による消磁を70mTまで段階的に行った結果、図3の例のように、殆どの試料では、消磁に伴う磁化変化はほぼ原点に向かう直線上にあり、梵鐘は安定な磁化を持っていた。



図2. 梵鐘と破片試料。
元興寺文化財研究所(2014)より引用、加筆した。

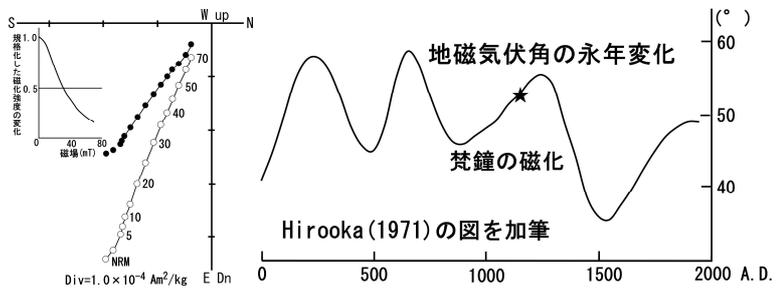


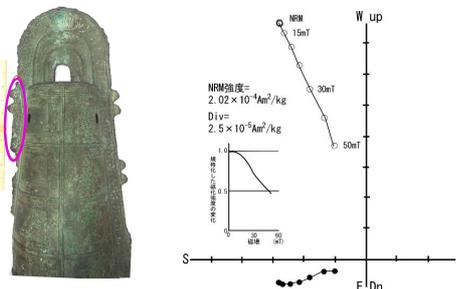
図3. 交流消磁(ザイダベト図)、
梵鐘の磁化と地磁気変化との比較

得られた磁化伏角を、地磁気伏角の永年変化(Hi rooka, 1971)と比較したが、12世紀中頃～後半の地磁気に近い結果が得られた。これは、梵鐘の銘の年代とほぼ同じか少し下る年代であり、梵鐘の再鑄造の可能性も示唆される。今後、梵鐘の破損による歪みの検討および、地磁気強度による年代の検討が行えると、より信頼性の高い結果が得られる。梵鐘の青銅は安定な磁化を有し、磁化研究は有効とわかった。

(3) 岐阜県可児市の久々利銅鐸の磁化研究

久々利銅鐸(現存の高さ111cm, 底部の長径41cm, 重さ26kg)は、突線鈕式銅鐸であり、弥生後期前～中葉の製作と考えられていた。磁化研究は、図4に記した破片(2点)について行った。周囲との接合関係と実測図より破片の銅鐸での原位置を求め、それを基に磁化データの補正を行った。

図4. 久々利銅鐸と測定試料、
交流消磁の例(ザイダベト図)。



磁化強度は $2.0 \times 10^{-4} \text{Am}^2/\text{kg}$ であった。図4に交流消磁の例を示すが、高消磁段階での磁化方向は低消磁段階の方向から僅かにずれ、銅鐸は鑄造途中に動き2成分となった可能性もある。磁化伏角は負を示

したので、鑄型では底部を上にして注湯されたと考えられる。平均伏角は 60 度程度と得られた。これは、弥生後期前～中葉の地磁気の伏角よりかなり深く、鑄造時、鑄型が傾いていた可能性もある。

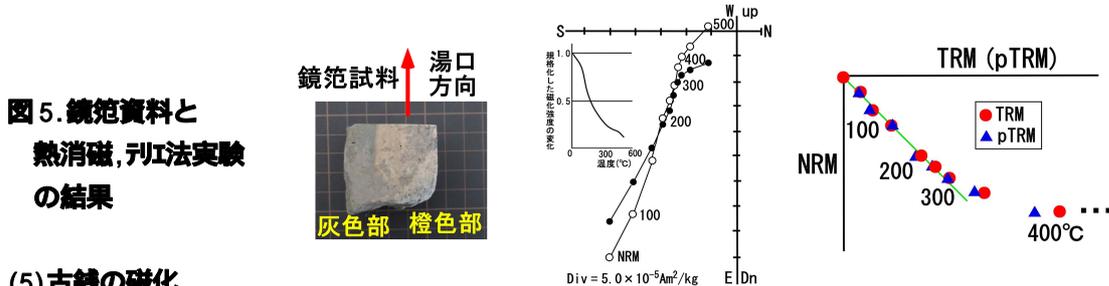
今後、帯磁率異方性も用いて破片の位置復元の精度を上げて、より信頼度の高い磁化を求めることが望まれる。長柄はこの銅鐸の 3D 計測からポリゴンデータを求めて注湯法を研究しており、その手法と磁化研究を総合することで、年代や製法の研究を更に進展できる。

(4) 中国山東省出土の鏡範資料の磁化研究

研究は図 5 の鏡面鑄型(鏡範)の一部で行った。この上部に湯口があったと考えられる。材質は、極めて細かい砂粒で内部に気泡が多かった。試料には灰色と橙色の部分があった。鑄型は作成時の焼成で橙色になっており、灰色部はその後の鏡の鑄造で青銅湯と接して、特に高温になった部分と考えられた。実際、携帯型帯磁率計の測定では、灰色部の帯磁率は大きく、高温までの被熱がわかった。

鑄型から小試料(約 2cm 立方)を切出して T/I 法実験を行った。加熱は、500 までの温度段階を採用した。図 5 中図に橙色部試料の熱消磁の結果(ザイゲルト図)を示すが、複数成分がみられた。これは、鑄型の製作時の焼成で磁化を獲得後、鏡の鑄造時の加熱によって新たな磁化が加わった為と考えられる。一方、灰色部の磁化はほぼ 1 成分を示し、高温まで熱せられ元の磁化が置き換わっていると考えられた。

T/I 法実験では、右図の様に、300-350 までの温度で線形関係が得られた。帯磁率の温度変化では 400 以上で 2 倍近く強くなり、実験時の加熱で磁性鉱物に変質したと考えられる。線形関係を示すプロットの直線近似から磁場強度は、約 33 μT と推定された。これは、鑄型が鑄造に使われた時代の地磁気強度であり、中国の地磁気強度の永年変化との対比により年代推定も行える。



(5) 古銭の磁化

銭貨は磁化を持っており、磁化と蛍光 X 線分析の併用が偽銭の判別に有用と判明した。また銭貨の鑄型は、鑄造時に湯通し付近は熱残留磁化を獲得されており、磁化研究が可能とわかった。

(6) 青銅緑青の ^{14}C 年代

小田は、青銅緑青の ^{14}C 年代研究を行い、緑青を真空中で加熱調製する際、250 では確度の高い年代が得られるが、より高温では、温度上昇に伴い古い年代値に傾くことを認めた。

(7) 三角縁神獸鏡の製作技術

清水は、三角縁神獸鏡の製作技術を検討した。同鑄型で作られた「同範鏡」が他の鏡種に比べて圧倒的に多数見つかっており、青銅鏡鑄造技術の復元、検証にも最適の考古資料である。文献史的にも『魏志倭人伝』に記載された魏の皇帝が卑弥呼に贈った「銅鏡百枚」に比定する見解がある。歴史上重要な銅鏡に関して、湯口方向を資料観察で決定できる資料とできない資料を見極め、科学分析とは別に考古学的な判断を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 清水康二, 宇野隆志, 菅谷文則	4. 巻 58
2. 論文標題 三角縁尚方作二神二獸鏡と製作技術に関する諸問題	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 博古研究	6. 最初と最後の頁 37-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 河合俊, 松田篤, 長江真和, 杉本圭祐, 杉本和江, 長柄毅一, 三船温尚	4. 巻 11
2. 論文標題 岐阜県可児市所蔵の久々利銅鐸の成分分析・3D計測・X線透過撮影	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 アジア鑄造技術史学会誌	6. 最初と最後の頁 55-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 伊藤光雅, 酒井英男	4. 巻 23
2. 論文標題 磁化測定による中世古銭の判別および製法の研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本情報考古学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 38-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 酒井英男, 長柄毅一, 中村和之	4. 巻 23
2. 論文標題 磁化特性による青銅製品の研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本情報考古学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 41-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長柄毅一, 廣川守, 奥山誠義他	4. 巻 57
2. 論文標題 古代青銅鏡の鏡面から取得した金属組織画像による非破壊定量分析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 銅と銅合金(日本銅学会)	6. 最初と最後の頁 30, 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 酒井英男, 菅頭明日香, 長柄毅一	4. 巻 21
2. 論文標題 青銅の磁化研究の試み	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本情報考古学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 49, 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 菅頭明日香, 酒井英男	4. 巻 709
2. 論文標題 考古地磁気年代推定法を用いた最近の研究動向	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 考古学ジャーナル, ニュースサイエンス社	6. 最初と最後の頁 24, 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長柄毅一, 野原悠暉, 廣川守, 飯塚義之, 三船温尚	4. 巻 11
2. 論文標題 古代高錫青銅器における金属組織と非破壊分析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 アジア鑄造技術史学会研究発表概要集	6. 最初と最後の頁 54, 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水康二, 宇野隆志, 菅谷文則, 豊岡卓之	4. 巻 11
2. 論文標題 鏡範再利用による鑄鏡技術	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 アジア鑄造技術史学会研究発表概要集	6. 最初と最後の頁 60, 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 小田寛貴, 山田哲也, 塚本敏夫, 山形秀樹, 竹原弘展, 中村賢太郎, 加藤文典
2. 発表標題 青銅器の炭素14年代測定の可能性と問題点: 緑青の加熱分解炭素抽出法について
3. 学会等名 日本文化財科学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井英男, 長柄毅一, 中村和之
2. 発表標題 磁化特性による青銅製品の研究
3. 学会等名 日本情報考古学会第43回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井英男, 菅頭明日香, 長柄毅一
2. 発表標題 青銅の磁化研究
3. 学会等名 日本情報考古学会第41回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井英男, 菅頭明日香
2. 発表標題 考古地磁気と窯跡の電磁気探査
3. 学会等名 東洋陶磁学会第45回大会(多治見)(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Oda, H.
2. 発表標題 Radiocarbon dating of bronze implement
3. 学会等名 Invite lecture at the Russian Academy of Science (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 酒井英男 地磁気・磁化による調査, 遺跡探査	4. 発行年 2019年
2. 出版社 勉誠出版編	5. 総ページ数 850
3. 書名 文化情報学事典, 村上征勝監修	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小田 寛貴 (Oda Hiroataka) (30293690)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長柄 毅一 (Nagae Takekazu) (60443420)	富山大学・学術研究部芸術文化学系・教授 (13201)	
研究分担者	清水 康二 (Shimizu Yasuji) (90250381)	奈良県立橿原考古学研究所・調査部調査課・指導研究員 (84602)	
研究分担者	菅頭 明日香 (Kanto Asuka) (90554072)	青山学院大学・文学部・准教授 (32601)	